الفصل الخامس

التأثيرات البيولوجية للإشعاعات المؤينة
Biological effects of the ionizing radiation

– مقدمة – فسيولوجية الإنسان وكيفية دخول المواد المشعة – الخلية الحية – تفاعلات الإشعاعات مع الخلية – التأثيرات الذاتية للإشعاعات – التأثيرات الوراثية للإشعاعات – أسئلة للمراجعة

5-1 مقدمة

يطلق اسم الإشعاعات المؤينة على جميع الإشعاعات النووية كالجسيمات المشحونة الثقيلة وجسيمات بيتا، والإشعاعات الكهرومغناطيسية (الأشعة السينية وأشعة جاما) الصادرة عن الذرة أو النواة، والنيوترونات وغيرها. فالجسيمات المشحونة الثقيلة وجسيمات بيتا (الإلكترونات والبوزترونات) تقوم بتأيين المادة مباشرة عند المرور فيها. أم بالنسبة لإشعاعات جاما والأشعة السينية، فتنتقل طاقتها أولا إلى إلكترونات المادة عن طريق العمليات الثلاثة المعروفة أو بعضها، ثم تقوم هذه الإلكترونات الثانوية بالتأيين وبالتالي تنتمي هذه الإشعاعات إلى المؤينة وإن كان التأيين يتم بطريقة غير مباشرة. وبالنسبة للنيوترونات فتنتقل طاقتها إلى المادة إما عن طريق التشتت المرن أو غير المرن على نوى ذرات المادة أو عن طريق امتصاص النيوترونات (خاصة الحرارية). وحيث أن جميع أجسام الكائنات الحية تحتوي على نسبة عالية جدا من الهيدروجين فإن طاقة النيوترونات تنتقل إلى نوى الهيدروجين (البروتونات)، ثم تقوم هذه الأخيرة بعملية التأين في الجسم. أما النيوترونات التي تمتص في نوى ذرات الجسم فتؤدي بدورها إلى تكوين نوى جديدة وانطلاق إشعاعات جاما التي تؤدي بدورها لتأيين ذرات أو جزيئات الجسم. بذلك تنتمي النيوترونات للأجسام المؤينة، وإن كان التأيين يتم بطريقة غير مباشرة.

وسواء كانت الإشعاعات المؤينة صادرة عن مصدر خارجي أم عن التلوث الداخلي للجسم (internal contamination) بالمواد المشعة فإنها تؤدي إلى تأثيرات بيولوجية في جسم الكائن الحي يمكن أن تظهر فيما بعد على شكل أعراض إكلينيكية (clinical symptoms). وتعتمد خطورة هذه الأعراض والفترة الزمنية اللازمة لظهورها على كمية الإشعاعات الممتصة وعلى معدل امتصاصها.

وتنقسم التأثيرات البيولوجية للإشعاعات في الكائنات الحية إلى نوعين. الأول يعرف بالتأثيرات الذاتية (somatic) وهي التأثيرات الناتجة في جسم نفس الكائن الحي الذي تعرض للإشعاعات. والثاني ويعرف بالتأثيرات الوراثية وهي التأثيرات الناتجة في ذرية الكائن (أبنائه أو أحفاده) نتيجة للتلف الإشعاعي للأعضاء التناسلية للشخص المتعرض.

5-2 فسيولوجية الإنسان وكيفية دخول المواد المشعة

إن معرفة فسيولوجية الإنسان (أي وظائف أعضاء جسم الإنسان وأجهزته المختلفة) ضرورية لفهم طرق وصول المواد المشعة لأعضاء الجسم وتوزعها داخله. وعموما، يتكون جسم الإنسان من عدة أعضاء وأجهزة يقوم كل منها بوظيفة معينة. وأهم الأجهزة اللازمة لفهم كيفية توزع المواد المشعة في الجسم هي الجهاز الدوري المسؤول عن ضخ وتوزيع الدم، والجهاز التنفسي المسؤول عن التزود بالأكسجين والتخلص من الغازات مثل ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء، والجهاز الهضمي المسؤول عن هضم وامتصاص الغذاء.

5-2-1 الجهاز الدوري The circulatory system

هو عبارة عن دارة مغلقة من الأنابيب ينتقل خلالها الدم من القلب إلى جميع أجزاء الجسم ثم يعود من هذه الأجزاء إلى القلب، الذي يدفع الدم غير المؤكسد إلى الرئتين حيث يتخلص من ثاني أكسيد الكربون ويتزود بالأكسجين، ثم يعود الدم المزود بالأكسجين إلى القلب

مرة ثانية ليوزعه على كافة أجزاء وأعضاء الجسم. والقلب عبارة عـــن مضختين. تقوم المضخة اليسرى بدفع الدم المحمل بالأكسجين والغـــذاء خلال الشرايين (arteries) إلى جميع أنسجة الجسم. وعند مرور الدم في الشعيرات الدموية تحدث عملية تبادل ينتقل خلالها الأكسجين والغذاء إلى الخلايا، في حين تنتقل الفضلات وثاني أكسيد الكربون من الخلايا إلـــى الدم. ثم يعود الدم في الأوردة إلى القلب. وأما المضخة اليمنى من القلب فتضخ الدم خلال الشريان الرئوي إلى الرئتين حيث يطرد ثاني أكســـيد الكربون ويتأكسد الدم ثم يعود من جديد خـــلال الأوردة الرئويـــة إلـــى القلب.

ويحتوي جسم الإنسان كامل النمو على حوالي 5 لترات من الدم وتدور هذه الكمية في الجسم مرة كل حوالي دقيقة. ويتكون الـــدم مـــن ثلاثة أنواع من الخلايا، هي الخلايا الحمراء (erythrocytes) ، والخلايا البيضـــاء (lymphocytes + granulocytes) ، والصـــفائح الدمويـــة (thrombocytes) ، وتقوم كل مجموعة من هذه الخلايا بوظيفة معينـــة. فتقوم الخلايا الحمراء بنقل الأكسجين والغذاء اللذان تحتاجهمـــا خلايـــا الجسم إلى كافة الأعضاء والأنسجة. وتقوم الخلايا البيضـــاء بمهاجمـــة الميكروبات، لذلك فهي تعتبر بمثابة وسيلة للدفاع ضدها. وأما الصـــفائح الدموية فمهمتها تكوين الجلطة الدموية عند حـــدوث أي جـــروح لمنـــع حدوث النزيف.

2-2-5 الجهاز التنفسي The respiratory system

تتلخص عملية التنفس في التخلص من ثـــاني أكســـيد الكربـــون وبخار الماء والحصول على الأكسجين اللازم لحـــرق الغـــذاء وتغذيـــة الخلايا. وتحدث هذه العملية في الرئتين عند مرور الدم في شـــعيراتهما فتتم عملية التبادل في الشعيرات القريبة مـــن الحويصـــلات الهوائيـــة. ويحتاج الإنسان البالغ إلى حوالي 20 مترا مكعبا من الهواء فـــي اليـــوم يستهلك نصفها تقريبا خلال ساعات العمل الثمانية.

وأثناء عملية التنفس يستنشق الإنسان مواد غريبة كثيرة تكون في حالة غازية أو في شكل غبار عالق في الهواء. فإذا كانت هذه المواد في

حالة غازية فإنها تمر مع الهواء إلى الدم بنسب كبيرة أو صغيرة حسب سرعة ذوبانها في الدم. وإذا كانت هذه المواد في شكل غبار فإنه يمكن أن يترسب جزء منها في الرئتين، ويخرج الجزء الآخر مع هواء الزفير أو أن يعلق في الجزء العلوي من الجهاز التنفسي، وبالتالي يتم بلعها مع الطعام. ويعتمد سلوك المواد المترسبة في الرئتين على سرعة ذوبانها فإذا كانت سريعة الذوبان فإنها تمتص بسرعة، (أي خلال ساعات محدودة) وتسري مع الدم. وأما إذا كانت بطيئة الذوبان فإنها تعلق في الرئتين لمدة طويلة قد تصل إلى عدة شهور. وبذلك، يتضح أن الجهاز التنفسي يعتبر أحد المداخل الرئيسة لدخول المواد المشعة للجسم ثم انتقالها للدم ومنه إلى أعضاء الجسم المختلفة.

3-2-5 الجهاز الهضمي The digestive system

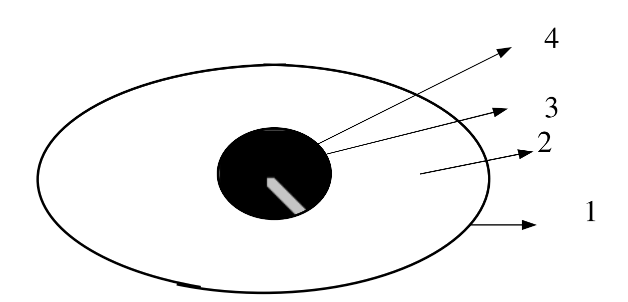
يتكون الجهاز الهضمي من القناة الهضمية المكونة بدورها من البلعوم والمريء والمعدة والإثنى عشر والأمعاء الدقيقة والأمعاء الغليظة وملحقاتها. ويتحول الغذاء في هذا الجهاز بفعل الإنزيمات الهاضمة إلى صور بسيطة ومناسبة لامتصاصه إلى الدم ومنه إلى خلايا الجسم، فتحصل بذلك على الطاقة اللازمة للاحتراق والغذاء اللازم للنمو وإعادة بناء الخلايا. وأما الغذاء الذي لم يمتص وكذلك البكتريا والخلايا الميتة التي تلفظها الأمعاء فتخرج جميعا في شكل فضلات صلبة (براز). وأما الفضلات السائلة وهي الفضلات والأملاح الذائبة في الماء التي تتكون داخل الخلية فيتم إخراجها عن طريق الكليتين (kidneys) والمسالك البولية.

وعند بلع المواد المشعة تمر مع الطعام عبر القناة الهضمية. فإذا كانت هذه المواد من النوع الذي يذوب في الماء أو بفعل الإنزيمات المختلفة فإنها تمتص مع الغذاء وتصل إلى الدم، الذي يوزعها على جميع أجزاء الجسم. ويمكن أن تتركز المواد المشعة في أعضاء معينة من الجسم. فعلى سبيل المثال يتركز السيزيوم 137 المشع في الأنسجة الرخوة في حين يتركز السترونشيوم 90 في العظام. وأما المواد غير القابلة للذوبان في الماء أو الأنزيمات فإنها تمر عبر الجهاز الهضمي كله

وتقوم بتشعيع (أي تعريضه للإشعاع) هذا الجهاز أثناء مرورهـــا فيـــه وخاصة الأمعاء.

3-5 الخلية الحية The cell

تتكون جميع أعضاء الكائنات الحية من وحدات دقيقة تعرف كل وحدة منها بالخلية. وأهم مكونات الخلية هي النواة والسائل المحيط بهـــا والمعروف باسم السيتوبلازم (cytoplasm) وجدار الخلية (شكل 5-1). ويعتبر السيتوبلازم بمثابة " المصنع " للخلية، في حين تحتوي النواة على جميع المعلومات اللازمة لقيام الخلية بوظيفتها وتكاثرها والمحافظة على خصائصها. فالسيتوبلازم يقوم بتحويل الغذاء الذي يصـــله إلـــى طاقـــة وجزيئات صغيرة. وتتحول هذه الجزيئات الصغيرة فيما بعد إلى جزيئات أكثر تعقيدا وهي التي تحتاجها الخلية لعمليات التجديد والانقســـام. أمـــا النواة فتحتوي علـــى الكروموســـومات (chromosomes) التـــي تعتبـــر تراكيب سلسلية طويلة من الجينات (genes) . وتحتوي خليـــة الإنســـان على حوالي 46 كروموسوما. وتتكون الجينات من حـــامض ديوكســـي ريبونيوكليك d-oxyribonucleic acid (DRA) ، ومن جزيئات بروتينية وتحمل هذه الجينات جميع المعلومات التي تحمل الصفات الوراثية.



شكل (5-1): الخلية

1- جدار الخلية   2- السيتوبلازم

3- جدار النواة   4- **النواة**

وتقوم الخلايا بالتكاثر للمحافظة على النوع وتعويض ما يموت منها. ويتراوح عمر الخلية (وبالتالي معدل انقسامها أو تكاثرها في الإنسان) بين عدة ساعات وعدة سنوات وذلك حسب نوع الخلية. ويحدث التكاثر عادة بطريقتين الأولى هي التكاثر اللاجنسي (mitosois) والأخرى هي التكاثر الجنسي (meiosis). ويحدث التكاثر اللاجنسي في خلايا الجسم العادية حيث يتضاعف عدد الكروموسومات طوليا ثم تنقسم الخلية الأصلية إلى خليتين متشابهتين تماما ومشابهتين للخلية الأصلية. أما التكاثر الجنسي فهو نوع خاص يحدث بين نوع من الخلايا تعرف باسم خلايا التكاثر الجنسي وهي الحيوان المنوي في الذكر والبويضة في الأنثى. ويحدث هذا النوع من التكاثر مرة واحدة خلال دورة حياة الخلية. فعند تلاقي الحيوان المنوي مع البويضة يتحدان وتتجمع كروموسوماتهما مكونين بذلك خلية جديدة تحتوي على الجينات (المواد الوراثية) من كلا الوالدين وتتكون بذلك البويضة المخصبة.

4-5 تفاعل الإشعاعات المؤينة مع الخلية

Interaction of the ionizing radiation with the cell

عند سقوط الإشعاعات المؤينة على الخلية فإنها تؤدي إلى تأين بعض مكوناتها وخصوصا جزيئات الماء، الذي يمثل الجزء الأكبر في أية خلية حية. ويؤدي تأين الماء إلى حدوث تغيرات كيميائية قد تؤدي بدورها إلى إحداث تغيرات في وظيفة الخلية. ويمكن أن تظهر نتائج هذه التغيرات في الإنسان في شكل أعراض إكلينيكية كالمرض الإشعاعي (radiation sickness)، أو إعتام عدسة العين (cataract)، أو في الإصابة بالسرطان على المدى الطويل.

وهكذا، تؤدي الإشعاعات المؤينة إلى إتلاف (damage) الخلية من خلال عدة مراحل مختلفة ومعقدة نوجزها فيما يلي:

1-4-5 المرحلة الفيزيائية **The physical stage**

تتم هذه المرحلة خلال زمن قصير جدا (حوالي 10^{-16} ثانية) من لحظة دخول الإشعاع أو الجسيم للخلية. وفي هذه المرحلة تنتقل الطاقة من النوع المعين من الإشعاعات إلى جزيئات الماء بالخلية ويحدث التأين طبقا للتفاعل التالي:

$$\text{Photon or particle} + H_2O \longrightarrow H_2O^+ + e^-$$

حيث H_2O^+ هو أيون الماء الموجب، e^- هو الإلكترون السالب.

2-4-5 المرحلة الفيزيوكيميائية The physico-chemical stage

وتتم هذه المرحلة خلال زمن قصير (حوالي 10^{-6}) بعد حدوث التأين، ويحدث خلالها تفاعل الأيونات الموجبة والسالبة مع جزيئات الماء الأخرى فينتج عن هذا التفاعل عدة مركبات جديدة. فعلى سبيل المثال، يمكن أن يتحلل أيون الماء الموجب مكونا أيون هيدروجين موجب H^+ وأيون هيدروكسيد OH طبقا للمعادلة التالية:

$$H_2O^+ \longrightarrow OH + H^+$$

أما الإلكترون السالب e^- فيمكن أن يتحد مع جزيء ماء متعادل مكونا بذلك أيون ماء سالب، أي أن:

$$e^- + H_2O \longrightarrow H_2O^-$$

ثم يتحلل هذا الأيون الأخير مكونا الهيدروجين وأيون الهيدروكسيد السالب أي

$$H_2O^- \longrightarrow H + OH^-$$

وهكذا، تؤدي هذه التفاعلات إلى تكوين كل من أيون الهيدروجين الموجب H^+ ، وأيون الهيدروكسيد السالب OH^- ، وذرة الهيدروجين المتعادلة H ، وجزيء الهيدروكسيد المتعادل OH. وأيونات الهيدروجين H^+ والهيدروكسيد OH^- موجودة دائما في الماء ولا تشترك،عموما، في إحداث تفاعلات تالية. أما بالنسبة للنواتج الأخرى وهي الهيدروجين H ، والهيدروكسيد OH المتعادلة فهي معروفة بنشاطها الكيميائي الشديد. كذلك، يمكن أن يتكون ناتج آخر هو فوق أكسيد الهيدروجين الذي يعتبر عاملا مؤكسدا قويا وذلك طبقا للتفاعل التالي:

$$OH + OH \longrightarrow H_2O_2$$

3-4-5 المرحلة الكيميائية The chemical stage

تستغرق هذه المرحلة عدة ثوان بعد المرحلة السابقة، ويتم خلالها تفاعل نواتج المرحلة السابقة وهي ذرة الهيدروجين H وجزيء الهيدروكسيد OH وفوق أكسيد الهيدروجين H_2O_2 مع الجزيئات العضوية المختلفة في الخلية. فمثلا، يمكن أن تتفاعل هذه النواتج مع الجزيئات المعقدة التي تتكون منها الكروموسومات فتتحد معها أو تؤدي إلى تكسير تراكيبها المتسلسلة الطويلة ويمكن أن تحدث، بالتالي، بعض التغيرات في الجينات.

4-4-5 المرحلة البيولوجية The biological stage

يتراوح زمن هذه المرحلة بين عدة دقائق وعدة عشرات السنوات. وتبدأ في هذه المرحلة ظهور تأثيرات التغيرات الكيميائية التي حدثت في الخلية. وبعض هذه التأثيرات هي:

أ- موت الخلية.
ب- منع أو تأخر انقسام الخلية أو زيادة معدل انقسامها.
ج- حدوث تغيرات مستديمة في الخلية تنتقل وراثيا إلى الخلايا الوليدة.

وهكذا، فإن تأثيرات الإشعاع على الإنسان والكائنات الحية ناتجة عن إتلاف الخلايا. ويمكن أن تتجلى هذه التأثيرات في نفس الشخص المتعرض للإشعاع نتيجة إتلاف الخلايا العادية لجسمه. وتعرف هذه التأثيرات، عندئذ، بالذاتية (somatic effects) . كذلك، يمكن أن تنتقل هذه التأثيرات إلى الأبناء أو الأجيال التالية للشخص المتعرض، وتعرف التأثيرات، عندئذ، بالوراثية (hereditary effects) . وتنتج هذه التأثيرات الوراثية عن إتلاف خلايا الأعضاء التناسلية للشخص المتعرض للإشعاعات المؤينة.

5-5 التأثيرات الحتمية والعشوائية للإشعاعات المؤينة

The deterministic and stochastic effects

5-5-1 التأثيرات الحتمية للإشعاعات The deterministic effects

يتم في معظم أجزاء وأنسجة الجسم البشري تجدد الخلايا الحية، حيث تموت بعض الخلايا ويتم استعواضها بتكوين خلايا جديدة، حتى يستطيع النسيج أو العضو أن يقوم بوظائفه الحيوية. وعند تعرض الأنسجة والأعضاء لجرعات عالية من الإشعاع يموت عدد كبير من خلاياه، ولا تستطيع عملية إعادة بناء الخلايا الجديدة استعواض العدد الكبير المفقود من خلاياه، وبالتالي يحدث نقص كبير في خلايا العضو أو النسيج، الأمر الذي يؤدي إلى فقد العضو أو النسيج لوظائفه. فإذا كان النسيج أو العضو من الأجزاء الحيوية لاستمرار حياة الكائن يكون الموت هو النتيجة الحتمية لهذا الكائن.

وعموما، تنتج التأثيرات الحتمية للإشعاع نتيجة استنزاف عدد كبير من خلايا الأعضاء أو الأنسجة. ويكون احتمال حدوث هذه التأثيرات معدوما عند الجرعات المنخفضة، إلا أنها تحدث حتما عندما تصل جرعة التعرض إلى حد (أو عتبة) معين. ويمكن القول أن التأثيرات الحتمية لا تحدث إلا بعد تجاوز الحد المحدد لكل تأثير، ولا يحدث ذلك إلا عند جرعات عالية جدا. وتؤدي الجرعات الإشعاعية في هذه المنطقة إلى استنزاف وحشي لخلايا الجدار المبطن للأمعاء، حيث يحدث فيه تلف شامل فتهاجمه البكتريا بوحشية. لذلك، تعرف هذه المنطقة من الجرعات بمنطقة الوفاة الناتجة عن الالتهابات المعوية (gastrointestinal death).

ومن أمثلة التأثيرات الحتمية المرض المعروف باسم المرض الإشعاعي، وإعتام عدسة العين وهو المرض المعروف باسم المياه البيضاء أو الكتراكت (cataract) ، والإريثيما (erythema) أو احمرار الجلد، وغيرها.

تلف الجهاز المركزي العصبي (CNS)

عموما، لا توجد بيانات كافية عن الإنسان حول حد الجرعة (أو العتبة) التي يبدأ عندها تلف الجهاز العصبي المركزي. إلا أن النتائج التجريبية على الحيوانات أثبت ظهور أعراض تدل على حدوث بعض التلف في الجهاز العصبي المركزي، وذلك عند جرعات عالية جدا (عدة عشرات من الغراي). لذلك، تسمى هذه المنطقة من الجرعات (التي تزيد على حوالي 30 غراي) بمنطقة الجهاز العصبي المركزي (CNS). ومع ذلك فقد ثبت أن الوفاة لا تتم عن هذه الجرعات في الحال، حتى بالنسبة للحيوانات التي تعرضت لما يزيد على 500 غراي.

الإريثيما Erythema

هناك تأثير آخر يظهر بمجرد التعرض للجرعات العالية نسبيا. ويعرف هذا التأثير باسم الإريثيما (erythema)، وهو عبارة عن احمرار الجلد. والجلد معرض للتعرض للإشعاعات أكثر من أي نسيج آخر في الجسم خصوصا بالنسبة للإشعاعات السينية ذات الطاقة المنخفضة وللإلكترونات (لأن قدرتها على الاختراق صغيرة). لذلك، فإن التعرض لجرعة مقدارها حوالي 3 غراي من الأشعة السينية ذات الطاقة المنخفضة يؤدي إلى إحداث مرض الإريثيما. وعند زيادة الجرعة يمكن أن تظهر أعراض أخرى كالحروق والتقيحات وغيرها.

وتجدر الإشارة إلى أن المناسيب الإشعاعية الناتجة عن محطات الطاقة النووية أو عن وسائل التطبيقات الصناعية أو الطبية للإشعاعات التي يتعرض لها العاملون في الظروف العادية (وليس في ظروف الحوادث) تكون عادة أقل بكثير من تلك المناسيب الإشعاعية الخطرة، طالما تم الالتزام بمتطلبات الوقاية من الإشعاع. ولكن يمكن الحصول على الجرعة الخطرة نتيجة وقوع حادث إشعاعي أو نووي (نتيجة سفور المصدر المشع مثلا خارج درعه أو دخول صالة مفاعل مثلا بينما تكون إحدى قنواته مفتوحة وغير ذلك كثير). ومع ذلك فإن الجرعات الصغيرة التي يحصل عليها العاملون أثناء عمليات التشغيل العادي يمكن أن تؤدي إلى تأثيرات ضارة، ولكن على المدى البعيد، وهذا ما يعرف بالتأثيرات المتأخرة.

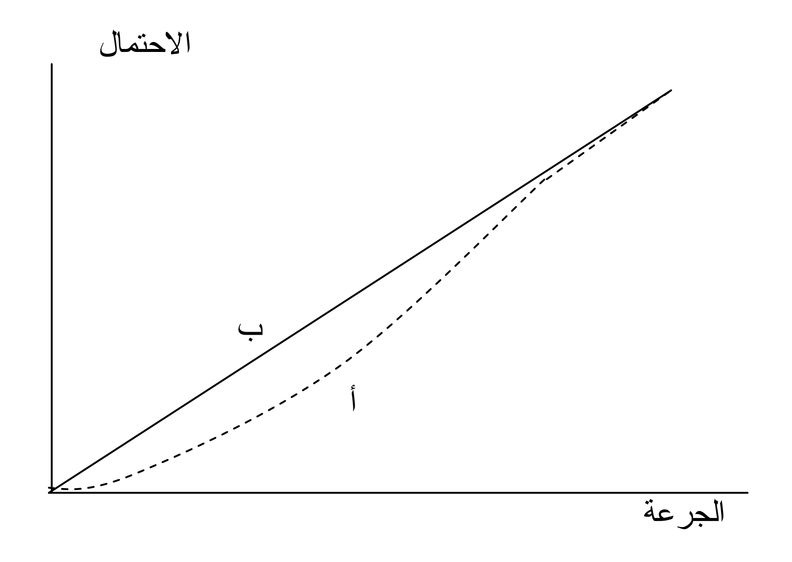
2-6-5 التأثيرات المتأخرة The late effects

أصبح الآن معلوما أن فنيي الأشعة أو المرضى الذين تم علاجهم أو تشخيص أمراضهم بجرعات إشعاعية عالية نسبيا معرضون للإصابة ببعض أنواع السرطان، أكثر من غيرهم ممن لم يتعرض للإشعاعات. ولقد أدت الدراسات الحديثة على المجموعات البشرية التي تعرضت للإشعاعات الناتجة عن القنابل الذرية أو عن الحوادث النووية مثل حادث تشرنوبل، أو المرضى الذين تم علاجهم بالإشعاعات النووية، أو عمال مناجم اليورانيوم، أو العاملين بالإشعاعات المؤينة كأجهزة الأشعة السينية والمعجلات المفاعلات النووية، إلى تأكيد قدرة الإشعاعات على تكوين السرطانات المتنوعة.

والسرطان هو عبارة عن تضاعف (تكاثر) الخلايا في العضو المعين بمعدل فوق المعدل الطبيعي. ويعتقد البعض أنه ناتج عن تلف جهاز التحكم في الخلية، مما يؤدي إلى انقسامها بمعدل أسرع من المعدل الطبيعي. وتحمل الخلايا الوليدة الصفة نفسها فتنقسم بدورها بالمعدل السريع نفسه، مما يؤدي إلى تكوين نسيج سرطاني يضر بالأنسجة العادية في العضو المعين.

وتقدير الفترة اللازمة لظهور الإصابة بالسرطان، بسبب التعرض للإشعاعات، عملية معقدة للغاية نظرا لعدم إمكانية فصل السرطان الناتج عن الإشعاعات المؤينة عن مثيله الناتج ذاتيا أو عن أسباب أخرى كالتعرض للمواد المسرطنة، على سبيل المثال. ولكن أظهرت بعض الإحصائيات أن السرطانات المختلفة قد تظهر خلال مدة تتراوح بين 5 ، 30 سنة من وقت التعرض للإشعاعات. ونظرا للصعوبات المختلفة المتعلقة بمدى الإصابة وزمن ظهورها فقد اتفق عالميا من وجهة نظر الوقاية الإشعاعية على أن أي جرعة من الإشعاعات – مهما قلت – تحمل معها احتمالا بالإصابة بهذا المرض. ولقد أمكن تقدير الإصابة بالمرض بالنسبة للمناسيب الإشعاعية العالية نسبيا. فقد تم عمل دراسات إحصائية دقيقة على المجموعات البشرية التي تتعرض لجرعات عالية من الإشعاعات كالأطباء وفنيي الأشعة وعمال مناجم اليورانيوم. إلا أن الدراسة الأكثر دقة هي تلك الدراسة

التي أجريت على ضحايا التفجيرين النوويين على كل من هيروشيما وناجازاكي في اليابان عام 1945 م . فقد تم دراسة العلاقة بين الجرعة الإشعاعية وبين نسبة الإصابة بالسرطانات المختلفة، وذلك عند الجرعات العالية. أما بالنسبة للجرعات المنخفضة فلا توجد بيانات إحصائية كافية عن الإنسان. لذلك، فقد استخدم امتداد المنحنى من الجرعات العالية إلى الجرعات المنخفضة وذلك كالمبين بالمنحنى أ على شكل (5–2). إلا أن اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية (ICRP) أوصت باستخدام الامتداد الخطي (المستقيم ب على الشكل 5–2) بدلا من المنحنى لتقدير احتمال الإصابة عند الجرعات المنخفضة. وتستخدم هذه البيانات حاليا لتقدير احتمال الإصابة عند التعرض للإشعاعات ذات المناسيب المنخفضة. وبناء على ذلك، فإنه إذا كان احتمال الإصابة بالسرطان عندما تتعرض مجموعة مكونة من 10000 شخص بالتساوي لجرعة مقدارها 10 ميللي سيفرت لكل شخص، هو خمسة أشخاص من بين هؤلاء العشرة آلاف، فإنه عند جرعة مقدارها 100 ميلي سيفرت لكل منهم يصبح احتمال الإصابة بالسرطان بين المجموعة هو 50 شخصا.



شكل (5–2)

العلاقة بين الجرعة الإشعاعية واحتمال الإصابة

وما زالت دراسة احتمال إصابة أعضاء الجسم المختلفة بالسرطان الناتج عن الإشعاعات تحت المراجعة المستمرة.

ويقوم عدد من اللجان الدولية مثل اللجنة العلمية للأمم المتحدة ، لدراسة تأثير الإشعاع الذري UNSCEAR ، وبعض اللجان الوطنية الأخرى في الولايات المتحدة الأمريكية واليابان والمملكة المتحدة وغيرها، بدراسة مخاطر الإصابة بالسرطانات المختلفة بسبب الإشعاعات المؤينة، وكيفية توزع الإصابات على أعضاء الجسم البشري. ولهذا الغرض يتم استخدام نماذج مختلفة للتقويم ومصادر شتى للمعلومات وأنماط مختلفة للتعرض. ويبين جدول (5−1) أحدث تقدير للاحتمالات النسبية لإصابة الأعضاء المختلفة بالسرطان المميت في كل من اليابان والولايات المتحدة والمملكة المتحدة والصين، وفي مدينة بورتريكو. كما يبين هذا الجدول القيم المتوسطة لهذه الاحتمالات عبر

جدول (5−2): الاحتمالات النسبية للسرطانات المميتة في الأعضاء المختلفة في خمس دول والاحتمالات النسبية المتوسطة.

العضو	الاحتمال النسبي تبعا للدولة					
	اليابان	الولايات المتحدة	بورتريكو	المملكة المتحدة	الصين	متوسط الاحتمال
الإثني عشر	0.038	0.014	0.098	0.30	0.269	0.090
المعدة	0.291	0.033	0.136	0.050	0.224	0.144
القولون	0.180	0.320	0.206	0.225	0.103	0.27
الرئتين	0.174	0.205	0.141	0.274	0.097	0.179
الصدر	0.023	0.075	0.048	0.085	0.022	0.052
الخصيتين	0.015	0.031	0.016	0.031	0.020	0.022
المثانة	0.052	0.076	0.078	0.091	0.026	0.067
النخاع العظمي	0.077	0.096	0.127	0.064	0.079	0.089
باقي الأعضاء	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
المجموع	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

الدول الخمس، وذلك لأعمار تتراوح بين صــفر ، 90 عامــا، وكقــيم متوسطة لكل من الذكور والإناث.

3-6-5 معامل المخاطر The risk factor

لتقويم احتمال الإصابة بالتأثيرات العشــوائية اســتخدم العلمــاء مصطلح معامل المخاطر. ويقصد بهذا المعامل احتمال الإصابة بالمرض العشوائي عند التعرض لجرعة إشعاعية محددة. وبالنســبة للأمــراض السرطانية، مثلا، فإن معامل المخاطر هو احتمال إصابة الفرد بالسرطان عند تعرضه لجرعة مقدارها 1 سيفرت (100رم). لذلك، يقاس معامــل المخاطر بوحدة 1/سيفرت.

وعند تغير مقدار الجرعة الفعالة التي يتعرض لها الفرد يتناســب معامل المخاطر تناسبا طرديا مع هذه الجرعة، حيث يتناســب احتمــال إصابته بالسرطان مع مقدار الجرعة الفعالة تناسبا طرديــا. فــإذا كــان احتمال الإصابة بالسرطان عند جرعة مقدارها 1 سيفرت هو 0.06 (أي 6 %) يصبح هذا الاحتمال عند جرعة مقدارها 2 سيفرت 0.12 ، (أي 12 %). وعندما تتعرض مجموعة بشرية عدد أفرادها n لجرعة فعالــة متساوية مقدارها E لكل فرد، تصبح قيمة الجرعة الفعالة الجماعيــة E_c هي:

$$E_C = E\, n$$

ولإيجاد احتمال الإصابة بالسرطان بين هذه المجموعة (أي عدد الإصابات السرطانية بين المجموعة) تستخدم العلاقة التالية:

عدد حالات الإصابة = متوسط الجرعة الفعالة للمتعرض ×عــــــــــــدد المتعرضـــــين×معامـــــل المخاطر.

ويبين جدول (5–2) معامل المخاطر السرطانية المختلفة عند التعرض لجرعة إشعاعية فعالة مقدارها 1 سيفرت طبقا لنموذجين من نماذج التقويم، وهما النموذج الضربي، ونموذج المعهد القومي للصحة بالولايات المتحدة الأمريكية (NIH)، حيث تتقارب نواتج معامل المخاطر للنموذجين.

مثال:

يتعرض 1000 عامل في مختبر إشعاعي لجرعة فعالة سنوية مقدارها 20 ميللي سيفرت. أحسب عدد الحالات التي تصاب بالسرطان المميت بين هذه المجموعة طبقا للنماذج المختلفة، إذا علمت أن كل واحد من هؤلاء العمال يعمل لمدة 40 عاما في نفس الظروف الإشعاعية.

الحل :

إجمالي الجرعة التي يتعرض لها الشخص الواحد طوال 40 عاما هي:

$$E = 20 \ (mSv/\ year) \times 40 \ years$$
$$= 800 \ mSv$$
$$= 0.8 \ Sv$$

احتمال إصابة العامل الواحد P_1 بالسرطان طبقا للنموذج الضربي هي:

$$P_1 = 0.8 \ (Sv) \times 0.1$$
$$= 0.08 \quad = 8 \ \%$$

عدد العاملين N_1 الذين يصابون بالسرطان المميت بين المجموعة هو:

$$N_1 = 0.08 \ \times 1000$$
$$= 80 \ workers$$

احتمال إصابة العامل طبقا لنموذج معهد الصحة الوطني NIH هي:

$P_2 = 0.8 \times 0.088$

$= 0.0704 = 7.04\ \%$

عدد العاملين الذين يصابون بالسرطان المميت بين المجموعة طبقا لهذا النموذج هو:

$N_2 = 0.0704 \times 1000$

$= 70.4 = 71$ workers

جدول (5-3): تقويم مخاطر الإصابة السرطانية
طبقا للنموذج الضربي، ونموذج المعهد الوطني الأمريكي للصحة.

الدولة	احتمال الإصابة لكل 1 سيفرت	
	النموذج الضربي	نموذج المعهد الوطني للصحة
اليابان	0.102	0.093
الولايات المتحدة	0.112	0.087
بورتريكو	0.095	0.102
المملكة المتحدة	0.129	0.097
الصين	0.063	0.060
متوسط الاحتمال	0.100	0.088

5-7 التأثيرات الوراثية للإشعاعات
The hereditary effects of radiation

سبق الإشارة إلى أن التأثيرات الوراثية للإشعاعات تنتج عن تلف الخلايا التناسلية. ويؤدي هذا التلف إلى مجموعة تغيرات – تعرف باسم التغيرات الوراثية (genetic mutations) في المادة الوراثية للخلية. وقد سبقت الإشارة إلى تكاثر يحدث نتيجة إخصاب البويضة (ovum) بالحيوان المنوي (sperm) ، وبالتالي تحصل البويضة المخصبة على مجموعة متكاملة من المواد الوراثية من كلا الوالدين. وبذلك، يحصل الطفل على مجموعتين متناميتين من الجينات (genes) بواقع مجموعة من كل والد. وقد وجد أن أحد الجينات يكون هو الغالب (أو السائد) في

حين يكون الآخر منحسرا. والجينات الغالبة هي التي تحـــدد الصـــفات الوراثية الشخصية.

أما الجينات المنحسرة فلا تقوم بدور في تحديـــد الصـــفات، إلا عندما يجتمع اثنان من الجينات من النوع المنحسر. ولما كانـــت معظـــم الأمراض تكمن في الجينات المنحسرة، لذلك فهي لا تكشف عن نفســـها إلا عندما يكون لدى الوالدين نفس هذه الجينـــات المنحســـرة. وتجـــدر الإشارة إلى أن التغيرات الوراثية الذاتية (أي بدون تأثير الإشعاع) هي المسئولة عن الجزء الأعظم من الخمسمائة مرض التـــي يعـــاني منهـــا العالم.

7-5 أسئلة مراجعة

1- اشرح وسائل دخول المواد المشعة لأعضاء الجسم المختلفة.

2- اشرح المراحل الأربعة لحدوث التلف الإشعاعي للخلية.

3- قارن بين التأثيرات الذاتية والوراثية للإشعاعات المؤينة.

4- ما هي التأثيرات المبكرة للإشعاعات على الإنسان؟.

5- ناقش مدى خطورة الجرعات المختلفة مـــن 1 إلـــى 10 جراي على الإنسان.

6- ما هي التأثيرات المتأخرة للإشعاعات؟، وكيـــف يمكـــن تقدير احتمال الإصابة بهذه التأثيرات؟.

7- ما هو معامل الخطورة للإصابة السرطانية؟، وما مقداره للنماذج المختلفة؟.

8- ما هي التأثيرات المتأخرة للإشعاعات؟، وكيف يمكن تقدير احتمال الإصابة بها؟.

9- احسب عدد المهددين بالإصابة بالسرطان نتيجة حادث نووي، أدى إلى تعرض 600000 فرد بواقع 10 ميللي سيفرت لكل منهم إذا كان معامل المخاطر هو 6×10^{-2} لكل سيفرت. (الحل: 360 إصابة سرطانية مميتة)